

京都大学大学院工学研究科
社会基盤工学専攻修士論文
令和8年2月



Master's Thesis
Department of Civil and Earth Resources Engineering
Graduate School of Engineering
Kyoto University
February 2026

Refraction-Aware Gaussian Splatting for Shallow Water Bathymetry from UAV Imagery

京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻

空間情報学講座

宇野 大輝

論文要旨

水中の3次元地形の計測は水深測量(Bathymetry)と呼ばれている。浅水域においても、河床・海底の水深測量は、地形変動のモニタリング、ハザードシミュレーション、および水生生物の生息環境評価において極めて重要である。近年、無人航空機(Unmanned Aerial Vehicle: UAV)を用いた写真測量(Photogrammetry)は、広範囲を効率的に調査する手法として注目されている。しかし、空中から水底を撮影する際、水面で発生する光の屈折が、従来の写真測量における幾何学的仮定(共線性条件)を根本的に破綻させるという課題がある。既存の手法は、屈折を完全に正確に物理的正確性を持ってモデル化しない経験的な補正や反復的な後処理に依存するか、あるいは説明可能性を欠くブラックボックス的な深層学習モデルを用いるものが多く、形状の幾何学的忠実性と外観の写実性を両立させることは困難であった。

本論文では、この課題を解決するために、物理的に忠実な二媒質屈折モデルを再構成パイプラインに直接組み込んだ“Refraction-aware 3D Gaussian Splatting”を提案する。本手法の核心的な貢献は、水中の真の位置にある3D Gaussianを、航空画像上の見かけの位置へと解析的にマッピングする微分可能なパラメータ変換の導入にある。これにより、標準的な3D Gaussian Splattingの柔軟なフレームワークを維持しつつ、屈折あり画像からの密な3次元形状と詳細なテクスチャ情報の復元を実現した。

評価実験では、屈折以外の光学的要因を排除し厳密な検証を行うため、物理ベースのレイトレーシングにより生成された河床のシミュレーションデータセットを用いた。その結果、水深10 mのスケールにおいて許容誤差10 cmとした場合の幾何学的F1スコアは96%を達成した。さらに、新規視点合成(Novel View Synthesis)においては、PSNR 25.9 dB、SSIM 0.93という詳細な屈折なし画像の推定を達成した。提案手法により、平坦な水面条件下において、河川、湖沼、沿岸域の低コストかつ高頻度な3Dモニタリングが可能となり、水域リモートセンシング分野に新たな方法論的基盤を提供する。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究課題	2
1.3 研究の目的と貢献	2
1.4 論文構成	3
第2章 関連研究	4
2.1 水深測量の概要	4
2.2 Photogrammetric Bathymetry	5
参考文献	7

第1章 序論

1.1 研究背景

地球表面の大部分を覆う水域、特に沿岸部や河川などの浅水域(Shallow Water)は、人間社会の経済活動、防災、生態系保全において極めて重要な役割を果たしている。河川管理における氾濫原の地形変状把握 [1]、沿岸域管理 [2]、生態系の生息環境評価 [3] など、水底の詳細な地形データを観測する水深測量(Bathymetry)は非常に重要である。しかしながら、これらの領域は従来の測量技術では取得が困難な空白地帯となりがちであった。

伝統的な船舶搭載型マルチビームソナー(深浅測量・音響測深)は、一定の深度がある海域においては標準的な手法であるが、水深が極めて浅い河川や海岸線付近においては、船舶の座礁リスクなどの航行不可領域の存在により、その運用は著しく制限される。近年では、小型の無人水上艇(Unmanned Surface Vehicle: USV)を用いた水深測量が注目されているが [4·5]、マルチビームの指向角の制限により、浅水域においては走査幅(Swath Width)が狭く、面的な測量を行うには時間的コストが高くなるという、非効率性の問題も生じる。一方で、航空機搭載レーザ測深(ALB: Airborne LiDAR Bathymetry)は [6]、広域かつ高精度な計測が可能であるが、導入および運用コストが極めて高く、高頻度なモニタリングには不向きであるという経済的な障壁が存在する。

こうした背景の中、近年急速に普及したドローンなどの無人航空機(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)を用いた写真測量(Photogrammetry)は、低コストかつ高解像度、高頻度なデータ取得が可能であることから、次世代の浅瀬測量技術として大きな期待を集めている。UAVにより空撮された多視点画像から、Structure-from-Motion (SfM) [7]、および Multi-View Stereo (MVS) [8·9] を用いて3次元形状を復元するアプローチは、陸部においては既に広い用途で実用化されている [10–12]。これらの技術を水中に適用する場合、その手法は空中からの水深写真測量(Photogrammetric Bathymetry)と呼ばれ、空中から撮像した多視点画像からの水中の三次元再構成問題と捉えることができる。水深写真測量には、光の反射や、水中での光の散乱・吸収による減衰、波による被写体の歪みなどの課題が存在するが、中でも最も根本的に重要な課題として取り組まれてきたのが光の屈折(Refraction)である。

1.2 研究課題

既存の SfM・MVS アルゴリズムの大部分は、幾何光学 (Geometry Optics) を前提としている。すなわち、撮像 (Image Sensing) のプロセスにおいて、観測対象となる被写体から発せられる光は、被写体からカメラ中心まで直進することを仮定する。しかし、UAV による水中撮影においては、光は水中から空気中へ進む際に、水面と異なる媒質の境界でスネルの法則 (Snell's Law) に従って屈折する。この物理現象によって、カメラから見た被写体の「見かけの位置」(Apparent Appearance) は、実際の位置よりも浅く、近く、歪ませる。屈折の影響を無視し、既存の SfM・MVS アルゴリズムを適用する場合、水深が実際よりも浅く評価される。これに対処するために、従来は SfM・MVS の出力結果に屈折率に基づく補正を適用する手法 [13,14] や、点群とカメラフレームの位置関係から推定する手法 [15,16]、手動で計測した数カ所の真値をもとに出力結果の補正率を回帰で決定する手法 [<empty citation>] が提案されてきた。こうした手法は、屈折の影響を補正する一方で、屈折の物理的特性を完全にモデル化しているわけではなく、視線角度依存性や多視点間の整合性を厳密に扱えないため、幾何学的精度には限界があった。直近では、[17] が、屈折の物理的特性を直接 SfM の最適化に組み込むことで、より高精度な再構成を実現する手法を提案している。しかし、この手法では、疎な出力結果を補うために、USV など高いコストを要する計測機器を用いた測量結果を用いた深層学習手法で補間する [18] 必要があり、学習データ不足とフィールド依存性という問題がある。

さらに、近年のコンピュータビジョン (Computer Vision)・コンピュータグラフィックス (Computer Graphics) の領域では、Neural Radiance Fields (NeRF) [19] や 3D Gaussian Splatting (3DGS) [20] といった、微分可能なレンダリング (Differentiable Rendering) を用いた新たな 3 次元表現・再構成手法が登場している。これらは任意視点における写真のようなリアルな新規視点合成 (Novel View Synthesis:NVS)において卓越した性能を示し、照明依存性、時間軸方向へ拡張、幾何情報の抽出といった多種多様な課題を克服するよう、日進月歩の進化を遂げている [<empty citation>]。特に、NeRF のような陰的三次元表現 (Implicit Representation) は計算コストが高く、幾何的な走査や解釈が容易ではない一方、3DGS は明示的な三次元 Gaussian 点群表現 (Explicit Representation) を持ち、高速かつ直接的な形状操作が可能であるという利点を持つが、空気中から観測する水中屈折を考慮した定式化は未だ十分になされていない。

1.3 研究の目的と貢献

以上の背景から、本修士論文では、UAV 空撮画像からの水中 3 次元復元において、物理的な屈折モデルを Gaussian Splatting(GS) のパイプラインに直接統合することで、幾何学的正確性と写実的な外観再現を両立させる新たな枠組み (Refractive-Aware Gaussian Splatting) を提案・実証する。本手法の核心的な貢献は、水中の真の位置にある 3D Gaussian を、UAV 空撮画像中の見かけの位置へと解析的にマッピングするパラメータ変換にある。この変換は、微分可能であるたり、GS の最適化過程に直接組み込むことで、屈折を含む入力画像から直接、屈折のない三次元シーン (3D Scene) を推定し、屈折の影響を排

した密な3次元形状と詳細なテクスチャ情報の復元を実現する。

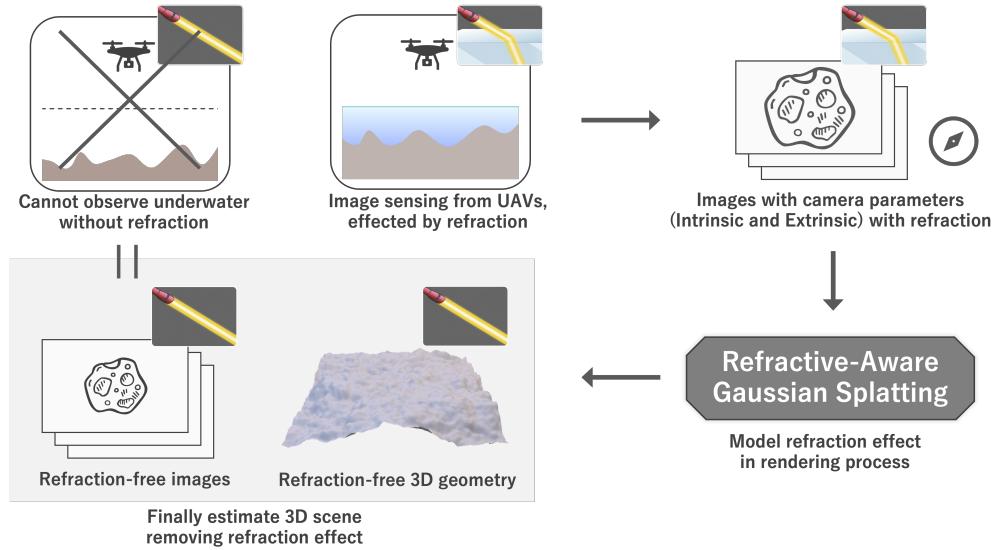


図 1-1: 空気中からの水深写真測量のタスクの概要。空中から水底を撮像したパラメータ既知の多視点画像を入力として、Refractive-Aware Gaussian Splatting を用いることで、屈折の影響を排除した水中の三次元シーンを再構成する。

検証においては、PBR レンダリング (Physically-Based Rendering:PBR) によってシミュレートされた合成データと実データの双方を用いて検証を行った。合成データでは、不観測地点からの再構成 3D モデルの視覚的品質を指す Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) が 25 dB を超え、提案手法から抽出した幾何情報では真値との幾何的復元精度を表す F1 スコア (F1-score) で 94% を超える結果を確認した。(合成データは深度 10 m、撮影高度 10 m のスケールである。完全に平面の水面とカメラパラメータ既知を仮定し、屈折の影響のみを考慮し、反射や減衰、波など屈折以外の物理的影響は除外している。F1 スコアは許容誤差 10 cm とした。) 実データにおいても、幾何的誤差を確認するなど、実用的な空中からの水深写真測量としての方法を確認した。

1.4 論文構成

本論文は導入部である第 1 章を含め、全 6 章で構成される。第 2 章では、水深測量の概要と諸手法といった関連研究に関して述べる。第 3 章では、本研究の基盤となる Gaussian Splatting やコンピュータビジョンの諸手法の学術的背景と理論に関して記述する。第 4 章では、提案手法である Refractive-Aware Gaussian Splatting の詳細な理論と実装に関して記述する。第 5 章では、検証において用いた合成データと実データの双方を用いて、提案手法の性能を定性・定量的に検証する。第 6 章では、研究の課題 (Limitation) と今後の課題 (Future Work) に関して述べ、研究の統括を行う。

第2章 関連研究

2.1 水深測量の概要

水深写真測量は重要だよ。地球の7割が水域だよ。にも関わらず、水底の詳細な地形データを観測する水深測量は大変で、海底のことは、宇宙や月のことよりも分からぬと言われがちだよ。近年 Seabed 2030 のような活動によって、地球の全域を測量しようとする気運が高まっているよ。(最近読んだ深海の地図をつくる? みたいな本を参照したいよ) それらはマルチビームソナーによる深浅測量によって行われるよ。これは音響測深とも呼ばれるように、水中の音波を用いて水深を測量する手法であるよ。(一般的なセンシングで用いられる電磁波は、真空や薄い空気中では伝搬し情報を伝えられるが、水中では媒質が水であるため、その水中で減衰しにくい情報を使用するしかないのだ。的なことをかっこよく述べていよ) 昔は鎖を下ろして、航海という人類の活動の基盤の一つで、船の座礁などのリスクを管理する重要な海の地図だけど、それを作るのはたいへんやった。(歴史) 昔は、地点ごとに鎖を下ろして、深さを図るなど、一地点で半日かかりだった。(って本に書いてたけど、何を参照しよう)。その後、シングルソナーマルチビームにより、面的な測量が可能になった。マルチビームが最も一般的な Bathymetry の手法だよ。(Bathymetry もまたハイドロなんとかって分野に含まれる一つらしいが、うまく水に関する工学や自然科学の体系をわかっていないや) 近年では、小型の無人水上艇(Unmanned Surface Vehicle: USV) を用いた水深測量が注目されているが [45]、マルチビームの指向角の制限により、浅水域においては走査幅(Swath Width) が狭く、面的な測量を行うには時間的コストが高くなるという、非効率性の問題も生じる。

一方、浅水域は、より人間社会に密接に影響を与えるよ。(人間は陸に住むしな) 洪水の影響を予測するためには、河川の形状データを用いて流体シミュレーションするし、伝統的河川治水方法(聖牛)を用いた河川マネジメントでは、増水のたびに変わる河川の地形を知りたいよ。(テンマの論文を引用! 具体的に想定するケースを明確に) また、生態系にはその生物の住む3次元的地形が密接に関連するよね。(こういう構造をシた場所だと産卵しやすいとか、外敵から身を守りやすいとか) あと、Geomorphology とかの学問でも重要でしょう。(体系的知識がないのでうまくまとめたい。Geology も) このように浅水域は海でも川でも、湖でも重要だよ。(特に共同の関連で私は川を念頭においているが、)

こうした浅水域を測量するのはとっても大変だよ。日本では、5年以内に一度、日本全国の川の水深測量を行う必要があるよ。人が実際にあって、棒尺で測定するのを本当にやるけど、危険で、空間解像度は低いし、アホほど Time Consuming だし、コストもばか。

浅水域では、深海とは異なり(深海ほど低くなくても)、電磁波(光)が完全に散乱、吸収されることなく、情報を残してくれるので、Remote Sensing のテクニックが使えるよ! [21] 近年では、ALB が導入され、人に変わって測量できるよ。日本でも 5 年だか 2 年に 1 回だか図るよ(ここらの河川マネジメントの資料は以前 Notion にまとめた。) LiDAR は Light Detection and Ranging の略で、光を用いて距離を測量する Passive な Remote Sensing だよ。水中で減衰しにくい緑とか青の波長域を照射し、水面で跳ね返るものと水中に潜って行くものを捉えることで、水底の形状を測量できるよ。深さもそこそこ行けるようになってきているよ。密度も正確性も、申し分ないけど、航空機の飛行コストや機材の高価さによって、継続的な高周期のモニタリングは難しいよ。Passive な Remote Sensing として、他にも Satelite ベース(プラットフォーム)で、マルチスペクトルと、水中での波長の減衰率の差から測量する手法もあるけど、どうしても経験に頼ったり、Cite-Dependency が強かったり明示的なモデル化をもとに水中の 3 次元形状を推定することはできないよ。そこそこ深い場所を大規模に、は、有効だけど、より浅い地域を高解像度に、正確には、向かないんじゃないかな(ちゃんと論文を読んだことがないので、正確か分からな。しっかり厳しく、調査して教えてほしいな? Survey 論文にいろいろ書いていたよ。) Sar を使う手法もあるけど全然わからないや。

2.2 Photogrammetric Bathymetry

そこで、着目するのは、写真測量だよ。Computer Vision 技術の発達とドローンの普及によって正確な測量が誰でもできるようになったよ(商用ソフトウェア、OpenSource いっぱいあるね。近接写真測量の枠組みで話しているよ) UAV(+ RTKGPS) は、効率性、機材の安価さ、手軽な測量による高周期のモニタリングが可能だよ。

地上において、UAV による写真測量は、広く実社会に普及しているよ。例えば、純粋な測量用途だけでなく、デジタルツインやメタバースといった 3D データ活用の重要性が広く認識されつつある中で、災害状況把握、森林マネジメント、など様々な分野で利用されるよ [10–12]。

水深測量に関しては、古い歴史があるよ。(1960 年代などから、やってる人がいるよ。引用したいけどわからん)

伝統的な船舶搭載型マルチビームソナー(深浅測量・音響測深)は、一定の深度がある海域においては標準的な手法であるが、水深が極めて浅い河川や海岸線付近においては、船舶の座礁リスクなどの航行不可領域の存在により、その運用は著しく制限される。近年では、小型の無人水上艇(Unmanned Surface Vehicle: USV)を用いた水深測量が注目されているが [4·5]、マルチビームの指向角の制限により、浅水域においては走査幅(Swath Width)が狭く、面的な測量を行うには時間的コストが高くなるという、非効率性の問題も生じる。一方で、航空機搭載レーザ測深(ALB: Airborne LiDAR Bathymetry)は [6]、広域かつ高精度な計測が可能であるが、導入および運用コストが極めて高く、高頻度なモニタリングには向きであるという経済的な障壁が存在する。

こうした背景の中、近年急速に普及したドローンなどの無人航空機(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)を用いた写真測量(Photogrammetry)は、低コストかつ高解像度、高頻度なデータ取得が可能であること

から、次世代の浅瀬測量技術として大きな期待を集めている。UAV により空撮された多視点画像から、Structure-from-Motion (SfM) [7]、および Multi-View Stereo (MVS) [8·9] を用いて 3 次元形状を復元するアプローチは、陸部においては既に広い用途で実用化されている [10–12]。これらの技術を水中に適用する場合、その手法は空中からの水深写真測量 (Photogrammetric Bathymetry) と呼ばれ、空中から撮像した多視点画像からの水中の三次元再構成問題と捉えることができる。水深写真測量には、光の反射や、水中での光の散乱・吸収による減衰、波による被写体の歪みなどの課題が存在するが、中でも最も根本的に重要な課題として取り組まれてきたのが光の屈折 (Refraction) である。

[14] は、SfM ソフトの出力結果に単に「屈折率」を掛け合わせるというシンプルな補正を行うことで、ドローン (UAV) 画像を用いた水中写真測量の可能性を実証しました。これに対し [16] は、見かけ上の点が視点によって異なること（視角依存性）を考慮し、画素ごとの光線の角度に基づいて 3 次元点を推定する「多角的な屈折補正」を提案しました。しかし、この手法はあくまで深さ（鉛直）方向のズレを補正するだけであり、水平方向の歪みについては無視されていました。そこで [17] は、計算が終わった後に補正したり何度も計算を繰り返したりするのではなく、SfM の処理プロセス（パイプライン）そのものに屈折モデルを直接組み込むことに成功しました。この R-SfM は正確なカメラ位置推定と、疎な 3 次元点群を提供する。しかし、深層学習を用いた補間手法 [22] を用いる必要があり、学習データ不足とフィールド依存性という問題がある。(もう少し Photogrammetric Bathymetry に関しては Survey するよ)

第3章 背景理論

3.1 画像に基づく3次元復元 (3D Reconstruction from Images)

画像を用いた測量は写真測量(Photogrammetry)と呼ばれ、古い歴史あり。<https://duplicate-3d.com/rd/2025-09-11-photogrammetry-history/> この記事を参考に。もともとは専門的な技能を持った人が、専用の機械(?)を用いて作成。

画像のデジタル化、イメージセンサの発明によりコンピュータビジョン(Computer Vision, CV)が始まる。Image Sensorから得た視覚情報から、人間や他の生物と同じように Computer や Machine に Scene を理解させる。

画像センサ(Image Sensor)が捉える情報は、本質的には3次元シーンから2次元平面への射影(Projection)である。この過程において、3次元空間の奥行き情報は1次元分欠落し、情報の「縮退」が発生する。3次元復元の主眼は、この失われた次元を幾何学的制約や事前知識(Priors)を用いて補完し、元のシーンの構造を逆問題として解くことにある。3次元情報は生物が自己が生きる世界を認識、理解するうえで必須の情報であり、ロボットの自己位置推定、環境認識などにも多大なニーズがあり、Computer Vision の主要タスクとして数多くの研究がなされ、今もめちゃくちゃレッドオーシャン。

古くから、単眼画像から形状を推定する手法として、輝度やテクスチャ、影などの手掛かりを利用する *Shape from X* ($X \in \{\text{shading, Silhouette, Texture, Focus, etc.}\}$) の研究が行われてきた。しかし、より頑健な復元を行うためには、視点移動を伴う複数枚の画像、あるいは動画(Image sequence)を用いて幾何的な整合性を元に手法が主流となった。この手法、タスクの総称を Structure from Motion (SfM) と呼ぶ。この SfM を起点とする、3D Vision for Geometry 手法の発達、高度な UI を備えた商用ソフト (Pix4D, Metashape, etc.) の出現、オープンソース化により、今日では Photogrammetry 技術は広く一般に普及した。

3.1.1 Structure from Motion

SfM は、複数の視点から撮影された画像群に基づき、カメラの内部・外部パラメータ(三次元的な動き)と、シーンの疎な(Sparse)3次元構造を同時に推定する手法である。Tomasi-Kanadeによる行列分解法に始まる。Hartley や Zisserman ら(2000年代)によって幾何学的理論の基礎が確立された。2016年に発表された COLMAP は、高い精度と汎用性、そして Open Source のプロジェクトとしての完成度か

ら現在でもアカデミック分野でデファクトスタンダードとして広く利用されている。また、COLMAPにより出力される、正確なカメラ内部パラメータ (Intrinsic) と外部パラメータ (Extrinsic) は、歪みのない画像 (Undistorted Images) は、後述する Dense Reconstruction や新規視点合成タスク のための入力データとして、重要なパイプラインの一角を担っている。

In a typical incremental SfM pipeline, keypoints are firstly detected and matched across frames using feature detectors and descriptors such as SIFT [Lowe2004_SIFT]. Fundamental matrix F between two images is then calculated, commonly via eight-points algorithm [Hartley1997_8PointAlgorithm] combined with random sample consensus (RANSAC) [Fischler1987_RANSAC], which lead to camera pose recovery through singular value decomposition. New camera poses are iteratively registered via Perspective-n-Point algorithms, which align estimated 3D points with 2D features in new frames. Triangulation is subsequently applied to obtain additional 3D points from feature correspondences, and bundle adjustment (BA) [Triggs2000_BA] is finally performed to minimize reprojection error, refining both camera parameters and 3D points. 画像を貼るぞい!!!<http://theia-sfm.org/sfm.html>

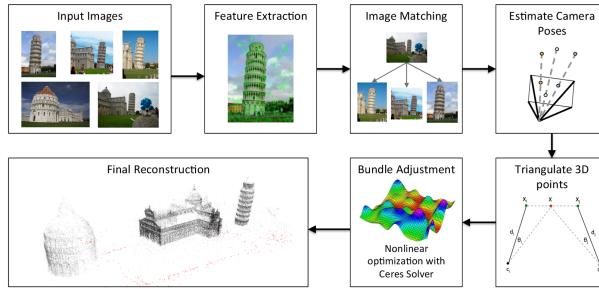


図 3-1: SfM Pipeline <http://theia-sfm.org/sfm.html>

一方、SfM が推定した疎な点群に対し、画素単位で密な復元を行うのが **Multi-View Stereo (MVS)** である。PatchMatch 法などのアルゴリズムを用い、各フレームにおける深度 (Depth) や法線 (Normal) の一貫性を最適化することで、精緻な幾何構造を構築する。これらは基本的に、光の直進性を前提とした幾何光学 (Geometric Optics) の枠組みに依存している。

3.1.2 フィードフォワード手法による次世代復元

近年 (2023-2025 年)、大規模データセットを用いた深層学習、特に Transformer アーキテクチャの導入により、従来の幾何学的手法を代替・補完する「フィードフォワード型」の手法が急速に台頭している。

- **Depth Anything:** 膨大な画像データから学習された 3D Priors を活用することで、未知のシーンに 対しても極めて精緻な単眼深度推定を実現している。
- **DUSt3R / MASt3R:** 従来の SfM/MVS のような複雑なパイプライン (特徴点抽出、マッチング、 bundle adjustment 等) を介さず、2 枚の画像から直接 Point Map を回帰する。これにより、カメラ

パラメータを事前に与えることなく、エンドツーエンドでの3次元形状およびカメラ姿勢の推定が可能となった。

これらの手法は、幾何光学的な制約に縛られず、学習によって獲得された「3次元的なもっともらしさ」を強力な手がかりとする。2005年のCVPR Best Paper (VGGTらによる研究) から続く視覚幾何学の系譜は、現在、大規模モデルによるデータ駆動型のアプローチへと大きなパラダイムシフトを迎えている。